

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.02.04

渭河干流宝鸡段水资源边际效益的研究

岳思羽^{1,2}, 李怀恩¹

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 陕西理工大学 化学与环境科学学院, 陕西 汉中 723000)

摘要: 传统的水资源分配只注重水资源能带来的经济效益, 忽视了其在生态环境中的价值, 不利于河流水资源的可持续管理。将河道生态基流视作一类用水部门, 通过建立河道生态基流边际效益的计算方法, 计算留存在河道中的水资源的边际效益, 利用柯布-道格拉斯生产函数, 计算三次产业的水资源边际效益, 可实现效益最大化下水资源的简单分配。以渭河干流宝鸡段枯水期为例对所建立的方法进行计算, 结果表明: 2001-2015年第二产业和第三产业的水资源用量少, 而边际效益高, 可维持现状; 河道生态基流和第一产业的水资源边际效益年均值低于5元/m³, 可使两者的边际效益相等, 求出枯水期同时满足经济效益和生态效益时的水量为10 m³/s, 此时水资源边际效益为1元/m³。

关键词: 河道生态基流; 边际效益; 等边际效益; 水资源; 三次产业; 渭河

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0019-06

Study on the marginal benefits of water resources in Baoji section of Wei River

YUE Siyu^{1,2}, LI Huaien¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Chemical and Environmental Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract: A key limitation of traditional water resources allocation was that, it only paid attention to the economic benefit of water resources and overlooked its value in the ecological environment, against sustainable management of the rivers. The ecological base flow could be regarded as a water-using department, and the marginal benefit of water remained in the channel was assessed by establishing a new calculation approach. Meanwhile, the marginal benefits of the tertiary industrial water were estimated on the basis of Cobb-Douglas production function. The calculated results were help to achieve the simply allocation of water resources for maximum benefits. Based on the example of the Baoji Section of Weihe River in the dry season, the results indicated that: the water consumption in the secondary industry and tertiary industry decreased from 2001 to 2015, but the marginal benefits were high, and can maintain the status quo; the average marginal benefits of ecological base flow and the primary industry were lower than 5 yuan/m³. Making them be equal can obtain the allocation of water resources 10 m³/s between the ecological base flow and the primary industry, and the corresponding economic benefits and ecological benefits can be satisfied, and the marginal benefits were 1 yuan/m³.

Key words: ecological base flow; marginal benefit; equal marginal benefit; water resources; three industries; Weihe River

1 研究背景

近代工业革命以后, 人口的持续增长和快速的城市化进程使得人类对水资源的需求不断增加^[1],

有限的水资源要同时兼顾生活饮用、农业灌溉^[2]、工业生产、航运发电等多种用途^[3], 导致河道中留存的水——即河道生态基流长期受到挤占^[4], 水量越来越少, 给流域生态环境系统造成不可逆转的影

收稿日期: 2018-11-30; 修回日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479162)

作者简介: 岳思羽(1982-), 女, 陕西汉中, 博士研究生, 工程师, 研究方向为水生态环境保护与环境经济。

通讯作者: 李怀恩(1960-), 男, 陕西商南, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源保护与环境经济。

响^[5]。此情况在水资源短缺地区尤为严重。因此,如何将有限的水资源合理投放到各用水部门^[6-7],实现效益最大化,是当前亟待解决的问题。

传统的流域水资源规划或水量分配一般只考虑水资源在能带来经济效益的用水部门之间的分配^[8],以达到减少用水总量、提高经济效益的目的。目前,这方面的研究成果较多,研究体系也相对成熟,主要有机会成本法^[9]、残值法^[10]、水足迹法^[11]、效益分摊系数法^[12]、成本效益分析^[13]、边际效益法^[14]、净现值法^[15]等。传统的分配方式一般不考虑河道生态基流,这也是枯水期水资源短缺地区的河道生态基流常常被占用的原因^[16]。近年来,随着流域生态环境问题的凸显,人类逐渐意识到不加节制地从河道中引水所带来的弊端,开始将可持续发展作为河流开发利用的出发点,谋求人与河流和谐发展的方式^[17],河道生态基流也成为研究热点^[18]。一些学者试图通过量化河道生态基流的价值,使人类认识到留存在河道中的水资源带来的巨大效益,如能值分析法^[19]、水文生态响应模型^[20]、功能价值法^[21]以及用经济用水的价值间接反映河道生态基流价值的水分生产函数法^[22-23]等。这些研究成果将水资源的生态效益以货币形式表现出来,为河道生态基流的价值研究做出了有益探索,但是没有将其直接与经济用水价值联系起来,无法使人类直观地将水资源的经济效益与生态效益放在同一层面上比较。

在可持续发展的价值观中,价值是主客体之间互利的关系范畴,这种关系是“同时满足主客体需要”的双向价值维度,有别于传统的“只满足主体需要”的单向价值维度。因此,从可持续发展出发,水资源的“效益最大化”应该是“经济、生态、社会效益的最大化”,这是水资源短缺地区推进生态文明建设^[24],保障区域经济社会健康发展的有效手段^[25]。所以,可将河道生态基流视作一类用水部门^[26],其效益就是对周边流域生态系统的支撑作用,使其参与到流域水量分配的效益权衡体系中,这对建立河道生态基流的保障体系具有重要意义。本文以边际效益为切入点,通过建立河道生态基流边际效益的计算方法,计算留存在河道中的水资源的边际效益;利用柯布-道格拉斯生产函数,计算三次产业经济用水的边际效益;并将流域中各用水部门不同的边际效益放在同一层面上进行比较,实现效益最大化下水资源的简单分配。

2 数据与方法

2.1 河道内水资源的效益分类

在水资源短缺地区的枯水期,根据水的用途及去向,可将河道内的水大致分为两类:人类用水和河道生态基流。人类用水包括生产用水、生活用水和公共设施用水,其中只有生产用水能产生经济效益,生活用水和公共设施用水的价值主要体现在社会效益上;河道生态基流给人类带来生态效益和社会效益。目前,经济效益的计算方法相对成熟,生态效益大部分都可以定量计算,只有社会效益难以量化,所以,本文只将生产用水的经济效益和河道生态基流中可以量化的生态效益进行对比计算,社会效益暂不考虑。

由于经济效益和生态效益的计算方法不同,且生态效益中不同计算方法得到的计算结果差异较大,为避免两者的计算结果缺乏可比性,采用边际效益法评价。“边际效益”是经济学中的一个概念^[27],在本文中指每增加1个单位的水资源所能增加的效益。另一方面,人类用水过程中,不仅从地表取水,也从地下取水;而且地表水又分为河流、湖泊、冰川等多种来源;无论是用水过程,还是经济社会统计中,这些水资源都是难以区分的。所以,为简化计算,假设:(1)在同一产业或领域内,1个单位水资源产生的边际效益是无差别的;(2)所有水资源均能达到用水水质要求;(3)水资源量均指新取水量,不包括回用水;(4)洪水期水量过大时,有些水量可能不属于河道生态基流范畴,为避免这种情况,本文只计算枯水期(12月-次年3月)水资源的边际效益,且认为在枯水期河道内的水资源只有人类用水和河道生态基流这两种去向。

2.2 河道生态基流的边际效益

2.2.1 河道生态基流的价值 目前,生态效益计算中应用比较广泛的方法是由 Costanza 等^[28]提出的生态系统服务价值计算体系,即先估算出每种生态系统服务的单位面积价值,再乘以每种生态系统的面积,得到总价值。河道生态基流的主要功能是维持河流的基本生态环境功能^[29],所以河道生态基流的价值也可以用这类方法计算:

$$V = \mu \sum (v_i \cdot S) \quad (1)$$

式中: V 为河道生态基流的价值,元; v_i 为河道生态基流功能的单位面积价值,元/ km^2 ; S 为渭河干流宝鸡段的水域面积, km^2 ; μ 为河道生态基流的稀缺系数。

水资源价值与其稀缺性密切相关:水资源越多,价值越低;随着水资源稀缺程度的不断增加,其价值也会逐渐增大,甚至呈现某种幂函数的增大态势^[30]。河道生态基流作为一类特殊的水资源,也符合这种特性,所以河道生态基流的稀缺系数可以表示为:

$$\mu = \left(\sum_{n=1}^3 \frac{\xi_n}{s_n} \right)^\theta \quad (2)$$

式中: s_n 为河道生态基流的稀缺当量因子,包括区域人均可用水量、区域降水量以及河道生态基流量 3 个因子; ξ_n 为各稀缺当量因子的权重, $\sum \xi_n = 1$, $0 \leq \xi_n \leq 1$; θ 为政策调节因子。

2.2.2 河道生态基流的边际效益 根据边际效益的定义^[31],可以认为,河道生态基流的边际效益指河道生态基流对应的 1 个单位水资源量的变化所带来的河道生态基流价值的变化,则计算公式为:

$$MB_E = |\Delta V| / |\Delta W| \quad (3)$$

式中: MB_E 为河道生态基流的边际效益,元/ m^3 ; ΔV 为河道生态基流价值的变化值,元; ΔW 为河道生态基流对应水量的变化值, m^3 。

ΔW 不仅指水资源量的增加,也包括水资源量的减少,所以, ΔV 不一定指价值增量,河道生态基流的减少有可能会造成价值减量。在计算时, ΔV 和 ΔW 均取绝对值。

2.3 生产用水的边际效益

柯布-道格拉斯生产函数(C-D 函数)是由美国数学家查尔斯·柯布和经济学家保罗·道格拉斯共同提出的。水资源是生产中不可或缺的要害,将其作为自变量纳入 C-D 函数,含有水资源要素的 C-D 函数式可以表示为^[32]:

$$Y = A \cdot K^\alpha \cdot L^\beta \cdot W^\gamma \quad (4)$$

式中: Y 为国民生产总值, 10^8 元; A 为技术水平; K 为固定资产投资, 10^8 元; L 为从业人数, 10^4 ; W 为用水量, $10^8 m^3$; α 为资本弹性系数; β 为劳动弹性系数; γ 为用水弹性系数。

对公式(4) 求关于 W 的偏导数,得:

$$MB_i = \frac{\partial Y}{\partial W} = A \cdot K^\alpha \cdot L^\beta \cdot \gamma \cdot W^{\gamma-1} = \gamma \frac{Y}{W} \quad (5)$$

式中: MB_i 为生产用水的边际效益,元/ m^3 ; Y/W 为单方用水产出率,元/ m^3 。

由公式(5) 可知,水对各产业的边际效益是用水弹性系数与单方用水产出率的乘积。

为正确反映水资源投入要素对产出的贡献,消除规模弹性的影响,采用折算用水弹性系数计算各产业用水的边际效益:

$$MB_i = \gamma' \cdot \frac{Y}{W} = \frac{\gamma}{\alpha + \beta + \gamma} \cdot \frac{Y}{W} \quad (6)$$

式中: γ' 为折算用水弹性系数; $(\alpha + \beta + \gamma)$ 为规模弹性系数。

3 结果与讨论

3.1 研究区域

3.1.1 区域概况 渭河位于我国干旱地区和湿润地区的过渡带,是黄河最大的支流,也是关中地区的母亲河。关中地区自古以来就是人类生产、生活的集中区,现在更是陕西省经济最发达的区域,在西部地区的经济社会发展中具有重要的战略地位和作用。所以,渭河流域生态系统的健康直接影响陕西省乃至整个西部地区经济社会发展的兴衰。

渭河干流宝鸡段是渭河干流关中段的一部分,是山区河流向平原河流的过渡段,全长 224 km(图 1)。1972 年宝鸡峡引渭工程、1999 年魏家堡水电站以及 2002 年宝鸡峡渠首加坝加闸工程的相继建成,虽然极大地解决了宝鸡峡灌区乃至关中西部水源不足的问题,但直接造成了渭河干流宝鸡段河道生态基流量的缺失,使渭河流域生态环境出现了不同程度的退化。计算河道生态基流价值可以使人类直观地认识到留存在河道中的水资源带来的巨大效益,对保障河道生态基流具有重要意义。

3.1.2 宝鸡市用水结构 根据《陕西省统计年鉴》和《黄河流域水文资料》,2001-2015 年宝鸡市用水结构与河道生态基流的对应水量如图 2 所示。生产用水按照第一产业(农林渔牧业)、第二产业(工业、建筑业)和第三产业(服务业)用水划分。渭河宝鸡段的林家村水文站位于宝鸡峡灌区引水灌溉渠首,水文站同时监测宝鸡峡引水渠流量(宝鸡峡渠)和引水后渭河干流流量(林家村三),所以林家村(三)的水文数据可以直接反映渭河宝鸡段河道生态基流的变化情况。

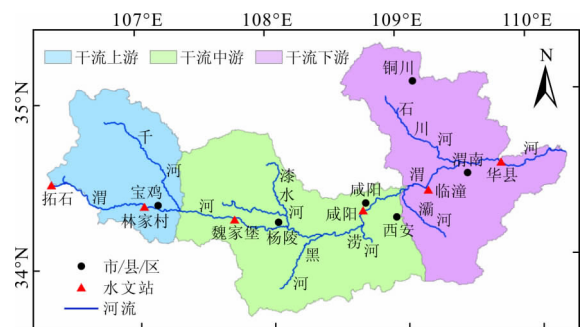


图 1 渭河干流关中段及主要水文站示意图

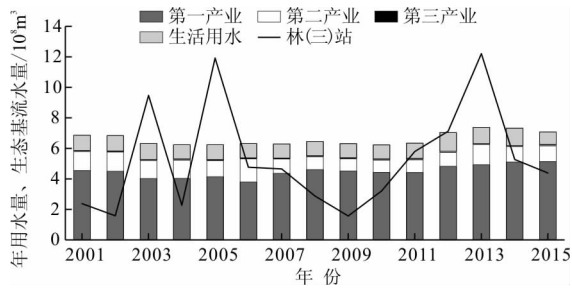


图2 2001-2015年宝鸡市用水结构与河道生态基流对比图

由图2可以看出,2001-2015年宝鸡市用水量相对稳定,河道生态基流的对应水量变化较大,说明无论渭河干流的丰枯变化情况如何,人类首先保证自己的生活用水和能带来经济效益的生产用水,这与人类没有认识到河道生态基流带来的巨大价值有关。在人类用水中,第一产业用水所占比例最高,约占60%~70%;其次是生活用水和第二产业用水,分别约占12%~18%;第三产业用水量最低。所以,第一产业是宝鸡市的主要用水户,也是河道生态基流保障的关键因素。

3.2 渭河干流宝鸡段水资源边际效益的计算

在计算渭河干流宝鸡段水资源的边际效益时,为使计算结果有可比性,根据银行利率将所有货币值折算到2015年,因此计算结果中的货币值均为2015年价格。

3.2.1 河道生态基流的边际效益 由于本课题组已经在《The Value of Environmental Base Flow in Water-Scarce Basins: A Case Study of Wei River Basin, Northwest China》一文中对渭河干流宝鸡段的河道生态基流价值进行了详细计算^[21],而且本文的重点在于水资源边际效益的计算与比较,所以在此不再重复计算,而是直接用河道生态基流价值的计算结果代入公式(3)计算河道生态基流的边际效益。

3.2.2 生产用水的边际效益 根据《陕西省统计年鉴》、《陕西省水利统计年鉴》等资料, Y 取各产业的生产总产值, K 取各产业的固定资产投资, L 取各产业的从业人数, W 取各产业的用水量。将相关数据代入公式(4),利用SPSS20.0软件进行双对数线性回归分析,得到三次产业的用水弹性系数 γ 分别为0.303、0.061和0.089,消除规模弹性影响的折算用水弹性系数 γ' 分别为0.198、0.061和0.089,可见水资源对第一产业的贡献率最高。

3.2.3 结果比较 以时间为横坐标,边际效益为纵坐标,可得渭河干流宝鸡段2001-2015年水资源边际效益按时间变化情况图(图3)。

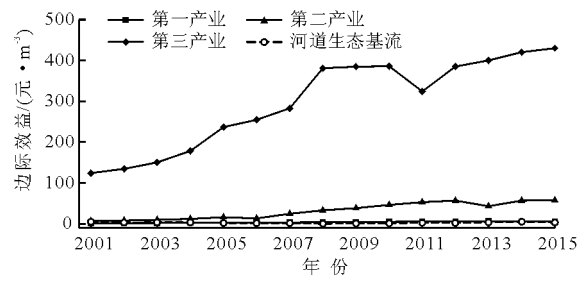


图3 2001-2015年渭河干流宝鸡段水资源边际效益按时间变化图

由图3可以看出,三次产业中,第一产业水资源的边际效益最低,但是其年均用水量 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,占人类用水的60%~70%,造成“高耗水、低产出”的现象。第一产业用水包括农田、林果、草场灌溉、鱼塘补水、牲畜用水等,其中以灌溉用水比例最高(约85%),且浪费巨大,如宝鸡峡灌区多年灌溉水利用系数约为0.55,远低于发达国家0.7以上的水平,所以,灌溉用水仍有“提高用水效率、压缩用水量”的空间。第二产业:宝鸡市是我国西北地区的工业重镇,但是在21世纪初水资源的边际效益很低,不足15元/ m^3 。自2006年开展“节水型社会”的建设以来,宝鸡市大力推广节水新技术、新工艺,工业用水重复率由75.5%提高到82.3%,在年均用水量(约 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$)几乎不变的情况下不断提升总产值,使得用水边际效益增幅明显,从2001年的7元/ m^3 上升到2015年的57元/ m^3 。宝鸡市第三产业以文化旅游、仓储物流为主,水资源边际效益本身很高(年均值298元/ m^3),而且年均用水量(约 $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3$)远低于第一产业和第二产业用水量,几乎没有压缩的空间。

将河道生态基流和生产用水的边际效益进行比较,可以看到第二产业和第三产业的水资源边际效益远高于河道生态基流的边际效益,而第一产业的水资源边际效益与其比较接近,2001-2015年的年均值都低于5元/ m^3 ,且随时间变化幅度较小。因此,第二产业和第三产业的用水量可以维持现状,仅在河道生态基流与第一产业用水之间建立权衡关系。

3.3 水资源边际效益权衡分析

以水资源量为横坐标,边际效益为纵坐标,得到河道生态基流和第一产业的水资源边际效益随水量变化情况图(图4)。由图4可以看出,河道生态基流的水资源边际效益符合“边际效益递减”规律,即随着水资源量的不断增加,效益增加值越来越少。第一产业的水资源边际效益呈递增趋势,原因可能

在于,农业生产需要资金、劳动力和水资源等生产要素的共同作用来完成,在一定技术水平下,这几种要素之间的关系是确定的,当增加水资源的投入量时,可能由于原有水资源数量不足而出现效益提升,使第一产业产值增加,出现了水资源边际效益递增的情况;当水资源增长到一定程度,即达到临界点时,再增加水资源就会出现过剩,那么其边际效益必然呈下降趋势。因此,宝鸡市第一产业出现用水边际效益递增的情况,可能说明目前宝鸡市农业生产的水资源用量在枯水期还未达到临界点,原有水资源投入数量不足,仍存在缺水的情况。

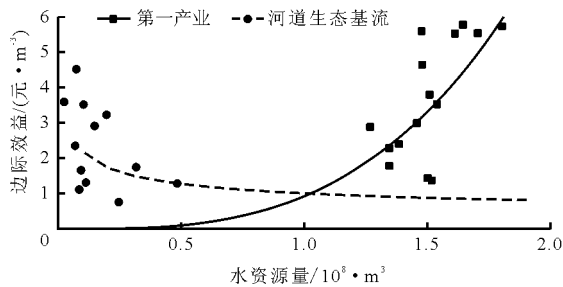


图4 渭河干流宝鸡段河道生态基流和第一产业水资源边际效益按水量变化图

对图4进行回归分析,河道生态基流边际效益随水量变化趋势表示为: $y = 1.02x^{-0.33}$ ($R^2 = 0.24$),第一产业水资源边际效益随水量变化趋势表示为: $y = 0.93x^{3.14}$ ($R^2 = 0.34$)。若使二者的 y 值相等,满足“等边际效益”,可以求出经济效益和生态效益同时满足时的水量, $x = 1.025 \times 10^8 \text{ m}^3$,即在枯水期河道生态基流量和第一产业的用水量均为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$,此时两者的边际效益均为 $1 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

3.4 结果分析

本文以边际效益为切入点,建立了一种利用经济手段来平衡人类用水和河道生态基流的简单方法。计算得到枯水期经济效益和生态效益同时满足时,渭河干流宝鸡段的河道生态基流量和第一产业用水量应均为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 。而2001-2015年枯水期林家村(合)站的平均流量仅为 $18 \text{ m}^3/\text{s}$,林家村(三)站的实际河道生态基流量为 $5 \text{ m}^3/\text{s}$,说明目前渭河干流宝鸡段水量不足,导致河道生态基流和第一产业均存在缺水状况。

另一方面,该计算结果是经济效益和生态效益同时满足时的最优值,而第一产业的水资源具有保障粮食安全等社会效益,河道生态基流具有提高生活品质等社会效益,由于这些社会效益难以量化,在本文中并没有计算。若将社会效益量化后加入计

算中,必然会对线性回归关系产生影响,继而影响权衡结果,需要在下一步进行研究。

4 结论

传统的水资源分配只注重水资源能带来的经济效益,忽视了其在生态环境中的价值,即水资源的生态效益或社会效益,不利于河流水资源的可持续管理。本文将河道生态基流视作一类用水部门,其效益就是对周边流域生态系统的支撑作用;通过定量计算河道生态基流的边际效益,并与传统国民经济用水部门的边际效益放在同一层面上比较,使其参与到流域水量分配的效益权衡体系中,这对于建立河道生态基流的保障体系具有重要意义。以渭河干流宝鸡段枯水期为例对所建立的方法进行验证,得到的结论有:

(1)2001-2015年宝鸡市用水量相对稳定,第一产业用水比例约占60%~70%,河道生态基流的对应水量变化较大,说明无论渭河干流的丰枯变化情况如何,人类首先保证自己的生活用水和能带来经济效益的生产用水,这与人类没有认识到河道生态基流带来的巨大价值有关。

(2)2001-2015年渭河干流宝鸡段第二产业和第三产业的用水量小,但水资源边际效益高,增长幅度较快。河道生态基流和第一产业的水资源边际效益年均值均低于 $5 \text{ 元}/\text{m}^3$,且随时间变化幅度小,所以第一产业是河道生态基流保障的关键因素。

(3)渭河干流宝鸡段河道生态基流的水资源边际效益符合“边际效益递减”规律,第一产业的水资源边际效益呈递增趋势。使两者满足“等边际效益”,可求出同时满足经济效益和生态效益时的水量,即在枯水期河道生态基流量和第一产业用水量均为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$,此时两者的水资源边际效益均为 $1 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

参考文献:

- [1] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. Nature, 2010, 467(7315): 555-561.
- [2] POOLE A E, BRADLEY D, SALAZAR R, et al. Optimizing agri-environment schemes to improve river health and conservation value [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 181: 157-168.
- [3] CHEN Ji, SHI Haiyun, SIVAKUMAR B, et al. Population, water, food, energy and dams [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 18-28.

- [4] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 1-11.
- [5] 方佳佳, 王焯, 孙涛, 等. 河流连通性及其对生态水文过程影响研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 19-26.
- [6] PASTOR A V, LUDWIG F, BIEMANS H, et al. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(12): 5041-5059.
- [7] LETCHER R A, CROKE B F W, JAKEMAN A J. Integrated assessment modelling for water resource allocation and management: A generalised conceptual framework [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(5): 733-742.
- [8] GEORGE B, MALANO H, DAVIDSON B, et al. An integrated hydro-economic modelling framework to evaluate water allocation strategies I: Model development [J]. *Agricultural water management*, 2011, 98(5): 733-746.
- [9] PULIDO-VELAZQUEZ M, ANDREU J, SAHUQUILLO A, et al. Hydro-economic river basin modelling: The application of a holistic surface-groundwater model to assess opportunity costs of water use in Spain [J]. *Ecological Economics*, 2008, 66(1): 51-65.
- [10] BERBEL J, MESA-JURADO M A, PISTÓN J M. Value of irrigation water in Guadalquivir Basin (Spain) by residual value method [J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(6): 1565-1579.
- [11] DUMONT A, SALMORAL G, LLAMAS M R. The water footprint of a river basin with a special focus on groundwater: The case of Guadalquivir basin (Spain) [J]. *Water Resources and Industry*, 2013, 1: 60-76.
- [12] ARENA C, CANNAROZZO M, FORTUNATO A, et al. Evaluating infrastructure alternatives for regional water supply systems by model-assisted cost-benefit analysis-A case study from apulia, Italy [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 89: 1460-1469.
- [13] LEBEL L, LEBEL P, CHITMANAT C, et al. Benefit sharing from hydropower watersheds: Rationales, practices, and potential [J]. *Water Resources and Rural Development*, 2014, 4: 12-28.
- [14] 吕素冰, 张亮, 王文川, 等. 河南省水资源利用演变及边际效益分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(9): 28-32.
- [15] ADUSUMILLI N, DAVIS S, FROMME D. Economic evaluation of using surge valves in furrow irrigation of row crops in Louisiana: A net present value approach [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 174: 61-65.
- [16] GREGORY K J. The human role in changing river channels [J]. *Geomorphology*, 2006, 79(3-4): 172-191.
- [17] AIT-KADI M. Water for development and development for water: realizing the sustainable development goals (SDGs) vision [J]. *Aquatic Procedia*, 2016, 6: 106-110.
- [18] ARTHINGTON A H, BUNN S E, POFF N L R, et al. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems [J]. *Ecological applications*, 2006, 16(4): 1311-1318.
- [19] YANG Wei, YANG Zhifeng. Integrating ecosystem-service tradeoffs into environmental flows decisions for Baiyangdian Lake [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 539-550.
- [20] AKTER S, GRAFTON Q, MERRITT W S. Integrated hydro-ecological and economic modeling of environmental flows: Macquarie Marshes, Australia [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 145: 98-109.
- [21] YUE Siyu, LI Huaien, CHENG Bo, et al. The value of environmental base flow in water-scarce basins: a case study of Wei River Basin, Northwest China [J]. *Water*, 2018, 10(7): 848.
- [22] SISTO N P. Environmental flows for rivers and economic compensation for irrigators [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 1236-1240.
- [23] 庞爱萍, 孙涛. 基于生态需水保障的农业生态补偿标准[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2550-2560.
- [24] 王建华, 胡鹏. 我国水生态文明建设内涵、评价标准与经验模式[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 430-436.
- [25] 李冰瑶, 陈星, 周志才, 等. 缺水地区水资源可持续利用评价与对策探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 104-108.
- [26] PERONA P, DÜRRENMATT D J, CHARACKLIS G W. Obtaining natural-like flow releases in diverted river reaches from simple riparian benefit economic models [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 118: 161-169.
- [27] 盖美, 郝慧娟, 柯丽娜, 等. 辽宁沿海经济带水资源边际效益测度及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 78-91.
- [28] COSTANZA R, d'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1998, 25(1): 3-15.
- [29] 李怀恩, 岳思羽. 河道生态基流的功能及价值研究——以渭河宝鸡段为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(11): 64-73.
- [30] 徐晓鹏, 武春友. 资源水价定价模型研究[J]. 中国水利, 2004(1): 24-26.
- [31] GIBBONS D C. The economic value of water [M]. RFF Press, 2013.
- [32] VÍLCU G E. A geometric perspective on the generalized Cobb-Douglas production functions [J]. *Applied Mathematics Letters*, 2011, 24(5): 777-783.